

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**PRIORITY
DOCUMENT**SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

RECEIVED

05 JAN 2005

WIPO

PCT

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung****Aktenzeichen:**

103 56 562.0

Anmeldetag:

04. Dezember 2003

Anmelder/Inhaber:

MTU Aero Engines GmbH, 80995 München/DE

Bezeichnung:Lotlegierung, Verwendung der Lotlegierung und Ver-
fahren zur Bearbeitung, insbesondere Reparatur, von
Werkstücken, insbesondere Gasturbinenbauteilen**IPC:**

B 23 K 35/28

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**München, den 15. Dezember 2004
Deutsches Patent- und Markenamt**Der Präsident**

Im Auftrag

Faust

P801125/DE/1

Lotlegierung, Verwendung der Lotlegierung und Verfahren zur Bearbeitung, insbesondere Reparatur, von Werkstücken, insbesondere Gasturbinenbauteilen

Die Erfindung betrifft eine Lotlegierung sowie ein Mehrkomponenten-Lötsystem. Weiterhin betrifft die Erfindung die Verwendung einer Lotlegierung und eines Mehrkomponenten-Lötsystems sowie ein Verfahren zur Bearbeitung, insbesondere Reparatur, von Werkstücken, insbesondere von Gasturbinenbauteilen.

Gasturbinen, wie zum Beispiel Flugzeugtriebwerke oder stationäre Gasturbinen, unterliegen im Betrieb einer hohen mechanischen und thermischen Beanspruchung. So können während des Betriebs eines Flugzeugtriebwerks Schaufeln, insbesondere Turbinenschaufeln, durch thermische Wechselbeanspruchung und Materialabtrag beschädigt werden. Daraus resultieren Thermoermüdungsrisse und erodierte Oberflächen, die bei der Wartung bzw. Instandsetzung des Flugzeugtriebwerks vollständig und zuverlässig instandgesetzt werden müssen. Dabei kommen nach dem Stand der Technik neben Schweißverfahren auch Lötverfahren zum Einsatz.

Hierbei werden nach dem Stand der Technik Lötverfahren und Lotwerkstoffe eingesetzt, wie sie zum Beispiel aus US 4,830,934 und US 5,240,491 bekannt sind. Diese aus dem Stand der Technik bekannten Lötverfahren werden zur Reparatur der obigen Schadensbilder sowie als Fügeprozesse bei der Herstellung eines Flugzeugtriebwerks verwendet. Da die Baugruppen eines Flugtriebwerks nach der Reparatur wieder einer hohen mechanischen sowie thermischen Belastung ausgesetzt sind, ist es notwendig, neuartige Lotlegierungen und Lötverfahren zur Verfügung zu stellen.

Hiervon ausgehend liegt der vorliegenden Erfindung das Problem zu Grunde, eine neuartige Lotlegierung sowie ein neuartiges Mehrkomponenten-Lötsystem zu schaffen. Weiterhin liegt der Erfindung das Problem zu Grunde, eine Verwendung für eine derartiges Lotlegierung sowie derartiges Mehrkomponenten-Lötsystem und ein Verfahren zur Bearbeitung, insbesondere Reparatur, von Werkstücken, insbesondere von Gasturbinenbauteilen, vorzuschlagen.

Dieses Problem wird durch eine Lotlegierung gemäß Patentanspruch 1 gelöst.

Erfindungsgemäß ist die Lotlegierung eine Nickelbasislegierung und enthält mindestens folgende Elemente: Chrom (Cr), Kobalt (Co), Molybdän (Mo) und Nickel (Ni). Das Molybdän (Mo) ersetzt das bei Lotlegierung nach dem Stand der Technik verwendete Wolfram (W). Molybdän (Mo) erhöht zwar durch Mischkristallhärtung die Festigkeit der γ -Nickelmatrix, ohne jedoch den Schmelzpunkt der Lotlegierung im gleichen Ausmaß wie Wolfram (W) unvorteilhaft zu erhöhen.

Nach einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung enthält die Lotlegierung zusätzlich Tantal (Ta), Niob (Nb) und Aluminium (Al). Hierdurch kann eine zusätzliche Festigkeit durch Teilchenhärtungseffekte erzielt werden. Tantal (Ta), Niob (Nb) und Aluminium (Al) sind γ' -bildende Elemente.

In diesem Zusammenhang ist folgende Zusammensetzung der Lotlegierung vorteilhaft:

- Chrom (Cr) in einem Anteil von 5 – 17 Gew.-%,
- Kobalt (Co) in einem Anteil von 8 – 15 Gew.-%,
- Molybdän (Mo) in einem Anteil von 1 – 5 Gew.-%,
- Aluminium (Al) in einem Anteil von 2 – 8 Gew.-%,
- Tantal (Ta) in einem Anteil von 1 – 8 Gew.-%,
- Niob (Nb) in einem Anteil von 0,1 – 2 Gew.-%, und
- Nickel (Ni) im Restanteil, sodass die Summe der Anteile 100 Gew.-% ergibt.

Nach einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung enthält die Lotlegierung zusätzlich Palladium (Pd) in einem Anteil von 0,5 bis 5 Gew.-% und Bor (B) in einem Anteil von 0,5 bis 2,5 Gew.-%.

Palladium (Pd) erniedrigt den Schmelzpunkt der Lotlegierung und erhöht durch Mischkristallhärtung die Festigkeit der γ -Nickelmatrix. Weiterhin ist vorteilhaft, dass Palladium (Pd) Benetzungsverhalten und Fließfähigkeit der aufgeschmolzenen Lotlegierung bzw. des aufgeschmolzenen Mehrkomponenten-Lötsystems verbessert.

In diesem Zusammenhang ist folgende Zusammensetzung der Lotlegierung vorteilhaft:

- Chrom (Cr) in einem Anteil von 5 – 17 Gew.-%,
- Kobalt (Co) in einem Anteil von 8 – 15 Gew.-%,
- Molybdän (Mo) in einem Anteil von 1 – 5 Gew.-%,
- Aluminium (Al) in einem Anteil von 2 – 8 Gew.-%,
- Tantal (Ta) in einem Anteil von 1 – 8 Gew.-%,
- Niob (Nb) in einem Anteil von 0,1 – 2 Gew.-%,
- Palladium (Pd) in einem Anteil von 0,5 – 5 Gew.-%,
- Bor (B) in einem Anteil von 0,5 – 2,5 Gew.-%, und
- Nickel (Ni) im Restanteil, sodass die Summe der Anteile 100 Gew.-% ergibt.

Nach einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung enthält die Lotlegierung zusätzlich Yttrium (Y) in einem Anteil von 0,1 bis 1 Gew.-% und Hafnium (Hf) in einem Anteil von 1 bis 5 Gew.-%. Das Hafnium (Hf) verbessert wie Palladium (Pd) Benetzungsverhalten und Fließfähigkeit der aufgeschmolzenen Lotlegierung bzw. des aufgeschmolzenen Mehrkomponenten-Lötsystems und erhöht gleichzeitig die Oxidationsbeständigkeit der gelöteten Bereiche. Um den Anteil an hafniumhaltigen, die Lotgefüge versprödenden Hardphasen gering zu halten, wird der Hafniumanteil auf 5 Gew.-% beschränkt.

Yttrium (Y) erniedrigt wie Palladium (Pd) und Bor (B) den Schmelzpunkt bzw. den Schmelzbereich der Lotlegierung, so dass durch die Elementkombinationen Pd-B-Y gezielt Löttemperaturen im Bereich von 1200 °C bis 1260 °C einstellbar sind.

Der Schmelzbereich ist definiert als das Temperaturintervall zwischen dem Aufschmelzen der ersten Legierungsbestandteile (Soliduspunkt) und dem vollständig flüssigen Zustand (Liquiduspunkt) der betreffenden Legierung.

In diesem Zusammenhang ist folgende Zusammensetzung der Lotlegierung vorteilhaft:

- Chrom (Cr) in einem Anteil von 5 – 17 Gew.-%,
- Kobalt (Co) in einem Anteil von 8 – 15 Gew.-%,
- Molybdän (Mo) in einem Anteil von 1 – 5 Gew.-%,
- Aluminium (Al) in einem Anteil von 2 – 8 Gew.-%,

- Tantal (Ta) in einem Anteil von 1 - 8 Gew.-%,
- Niob (Nb) in einem Anteil von 0,1 - 2 Gew.-%,
- Yttrium (Y) in einem Anteil von 0,1 - 1 Gew.-%,
- Hafnium (Hf) in einem Anteil von 1 - 5 Gew.-%,
- Palladium (Pd) in einem Anteil von 0,5 - 5 Gew.-%,
- Bor (B) in einem Anteil von 0,5 - 2,5 Gew.-%, und
- Nickel (Ni) im Restanteil, sodass die Summe der Anteile 100 Gew.-% ergibt.

Durch Zulegen von Silizium (Si) in einem Anteil von 0,1 bis 1 Gew.-% kann in Kombination mit dem Palladium, Bor und Yttrium der Schmelzpunkt der Lotlegierung weiter abgesenkt werden.

Eine besonders bevorzugte Lotlegierung ist in Patentanspruch 10 definiert, die erfindungsgemäße Verwendung derselben ergibt sich aus Patentanspruch 11.

Das erfindungsgemäße Mehrkomponenten-Lötsystem ist in Patentanspruch 12 definiert, die erfindungsgemäße Verwendung desselben in Patentanspruch 16.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Bearbeitung, insbesondere zur Reparatur, von Werkstücken ist durch die Merkmale des Patentanspruchs 17 gekennzeichnet.

Bevorzugte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Unteransprüchen und der nachfolgenden Beschreibung.

Die hier vorliegende Erfindung betrifft den Einsatz eines Lötverfahrens zur Reparatur von thermodynamisch belasteten Bauteilen einer Gasturbine, wie zum Beispiel von Leitschaufeln eines Flugzeugtriebwerks oder auch einer stationären Gasturbine. Die Erfindung betrifft nicht nur das Lötverfahren selbst, sondern vielmehr auch die Bereitstellung einer neuartigen Lotlegierung bzw. eines neuartigen Mehrkomponenten-Lötsystems sowie eine Verwendung der Lotlegierung sowie des Mehrkomponenten-Lötsystems. Die Lotlegierung und das Mehrkomponenten-Lötsystem eignen sich sowohl zur Reparatur von Turbinenteilen, die aus einer polykristallinen Legierung hergestellt sind, als auch für solche Turbinenteile, die aus einer gerichtet erstarrten oder einkristallinen

Legierung hergestellt sind. Durch die Anwendung des Lötverfahrens bzw. der Lotlegierung bzw. des Mehrkomponenten-Lötsystems sind in den gelöteten Bereichen der Gasturbinenbauteile ausreichend hohe mechanische Eigenschaften erzielbar, wie insbesondere die Ermüdungsfestigkeiten, so dass die strukturelle Integrität des betreffenden Bauteils einer Gasturbine erhalten bleibt. Weiterhin werden in den gelöteten Bereichen verbesserte Oxidations- und Korrosionseigenschaften gegenüber solchen Bereichen erzielt, die mit Lötverfahren nach dem Stand der Technik repariert werden.

Die neue erfindungsgemäße Lotlegierung ist eine Nickelbasislegierung und enthält neben Nickel (Ni) zumindest auch Chrom (Cr), Kobalt (Co) und Molybdän (Mo). Es liegt im Sinne der hier vorliegenden Erfindung, das bei Lotlegierungen nach dem Stand der Technik verwendete Wolfram (W) zum großen Teil durch Molybdän (Mo) zu ersetzen. Hierdurch wird vorteilhaft die Festigkeit des reparierten Bereichs durch Mischkristallhärtung der γ -Nickelmatrix erhöht, ohne dass nachteilig der Schmelzpunkt der Lotlegierung erhöht wird.

Neben Nickel (Ni), Chrom (Cr), Kobalt (Co) und Molybdän (Mo) enthält die erfindungsgemäße Lotlegierung Palladium (Pd) sowie Yttrium (Y). Sowohl das Palladium (Pd) als auch das Yttrium (Y) sind für die Absenkung des Schmelzbereichs der Lotlegierung in einen Bereich von 1050°C bis 1200°C vorteilhaft und verbessern gleichzeitig die Oxidationseigenschaften der Lotlegierung bzw. des gelöteten Bereichs. Das Palladium (Pd) wird vorzugsweise auf einen maximalen Anteil von 5 Gew.-% beschränkt, da es den Lotwerkstoff stark verteuert, wenn es in zu großen Mengenanteilen zulegiert wird.

Ein weiteres Element, welches die erfindungsgemäße Lotlegierung vorzugsweise weiterhin enthält, ist das Bor (B). Das Bor (B) ist wie das Palladium (Pd) und Yttrium (Y) für die Absenkung des Schmelzbereichs der Lotlegierung in einen Bereich von 1050°C bis 1200°C vorteilhaft und wird im Sinne der Erfindung auf einen maximalen Anteil von 2,5 Gew.-% beschränkt. Durch die Beschränkung des Bors (B) auf maximal 2,5 Gew.-% kann der versprödet wirkende Boridphasenanteil in den gelöteten Bereichen wirksam begrenzt werden.

Es liegt weiterhin im Sinne der hier vorliegenden Erfindung, dass die erfindungsgemäße Lotlegierung zusätzlich zu den oben genannten Elementen einen entsprechenden Anteil

von Aluminium (Al), Tantal (Ta) und Niob (Nb) enthält. Der Anteil des Aluminiums (Al) liegt vorzugsweise zwischen 2 und 8 Gew.-%. Tantal (Ta) wird in einem Anteil von 1 bis 8 Gew.-% und Niob (Nb) in einem Anteil von 0,1 bis zu 2 Gew.-% in der erfindungsgemäßen Lotlegierung enthalten. Durch die Zulegierung von γ' -Phasen bildenden Elementen, wie Tantal (Ta), Niob (Nb) und Aluminium (Al), wird in den gelöteten Bereichen neben der bereits geschilderten Mischkristallhärtung zusätzliche mechanische Festigkeit durch Teilchenhärtung erzielt.

Zusätzlich kann die erfindungsgemäße Lotlegierung Hafnium (Hf) in einem Anteil von 1 bis 5 Gew.-% enthalten. Durch die Verwendung von Hafnium werden die Benetzungs- und Fließeigenschaften der aufgeschmolzenen Lotlegierung und die Oxidationsbeständigkeit der reparierten Bereiche des betreffenden Bauteils positiv beeinflusst. Der Anteil des Hafniums (Hf) wird auf den angegebenen Maximalwert von 5 Gew.-% beschränkt, um den Anteil an verspröde wirkenden hafniumhaltigen Hardphasen in den gelöteten Bereichen zu beschränken.

Weiterhin kann die erfindungsgemäße Lotlegierung Silizium (Si) in einem Anteil von 0,1 bis 1 Gew.-% enthalten. Durch die Zugabe des Siliziums (Si) kann die schmelzpunktniedrigende Wirkung des Palladiums (Pd), Yttriums (Y) und Bors (B) unterstützt und verstärkt werden, ohne dass der Boridphasenanteil in den reparierten Bereichen des Bauteils erhöht wird.

Nach einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der hier vorliegenden Erfindung verfügt die erfindungsgemäße Lotlegierung über folgende Zusammensetzung:

- Chrom (Cr) in einem Anteil von 5 – 17 Gew.-%,
- Kobalt (Co) in einem Anteil von 8 – 15 Gew.-%,
- Molybdän (Mo) in einem Anteil von 1 – 5 Gew.-%,
- Aluminium (Al) in einem Anteil von 2 – 8 Gew.-%,
- Tantal (Ta) in einem Anteil von 1 – 8 Gew.-%,
- Niob (Nb) in einem Anteil von 0,1 – 2 Gew.-%,
- Yttrium (Y) in einem Anteil von 0,1 – 1 Gew.-%,
- Hafnium (Hf) in einem Anteil von 1 – 5 Gew.-%,
- Palladium (Pd) in einem Anteil von 0,5 – 5 Gew.-%,

Bor (B) in einem Anteil von 0,5 – 2,5 Gew.-%,
Silizium (Si) in einem Anteil von 0,1 – 1 Gew.-%,
Nickel (Ni) im Restanteil, sodass die Summe der Anteile 100 Gew.-% ergibt.

Nach einem weiteren bevorzugten Ausführungsbeispiel der hier vorliegenden Erfindung verfügt die erfindungsgemäße Lotlegierung über folgende Zusammensetzung:

Chrom (Cr) in einem Anteil von 9 – 11 Gew.-%,
Kobalt (Co) in einem Anteil von 9 – 11 Gew.-%,
Molybdän (Mo) in einem Anteil von 3,5 – 4,5 Gew.-%,
Aluminium (Al) in einem Anteil von 3,5 – 4,5 Gew.-%,
Tantal (Ta) in einem Anteil von 1,5 – 2,5 Gew.-%,
Niob (Nb) in einem Anteil von 0,5 – 1,5 Gew.-%,
Yttrium (Y) in einem Anteil von 0,1 – 0,5 Gew.-%,
Hafnium (Hf) in einem Anteil von 3,5 – 4,5 Gew.-%,
Palladium (Pd) in einem Anteil von 3,5 – 4,5 Gew.-%,
Bor (B) in einem Anteil von 1,5 – 2,0 Gew.-%,
Nickel (Ni) im Restanteil, sodass die Summe der Anteile 100 Gew.-% ergibt.

Die erfindungsgemäße Lotlegierung eignet sich besonders zur Verwendung bei der Reparatur von Leitschaufeln eines Flugzeugtriebwerks, wobei die Leitschaufeln entweder aus einer polykristallinen oder gerichtet erstarrten oder einkristallinen Legierung hergestellt sein können. Nach Reparatur der betreffenden Bereiche der Gasturbine mithilfe der Lotlegierung verfügen die gelöteten Bereiche über mechanische Eigenschaften, die weitestgehend dem Material der unbeschädigten Leitschaufel entsprechen. Die Lotlegierung ist speziell für den Zweck der Reparatur von Triebwerksbauteilen angepasst.

Die erfindungsgemäße Lotlegierung verfügt über optimierte Schmelzeigenschaften, Fließeigenschaften und Benetzungseigenschaften sowie über ein optimiertes Rissfüllvermögen.

Der Einfluss der schmelzpunktniedrigenden Elemente Yttrium (Y) und Palladium (Pd) auf den Schmelzbereich der Lotlegierung wird anhand der folgenden kalorimetrischen Messungen deutlich.

Im Folgenden werden vier Lotlegierungen A2, A3, A5 und A10 miteinander verglichen.
(Zusammensetzung siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Zusammensetzungen der Lotlegierungen, Gehalte in Gewichtsprozent.

Lotleg.	Ni	Cr	Co	Mo	Al	Ta	Nb	Y	Hf	Pd	B
A2	Bal.	10	10	4	4	2	1	0,5	4	4	1,8
A3	Bal.	10	10	4	4	2	1	0	0	4	1,8
A5	Bal.	10	10	4	4	2	1	0,5	0	0	1,8
A10	Bal.	10	10	4	4	2	1	0	4	0	1,8

Nach dem Erschmelzen der Lotlegierungen in einem Lichtbogenofen zu etwa 10g schweren Blöcken, wurden diesen Blöcken für die kalorimetrischen Messungen Proben von 50-70 mg Masse entnommen. An diesen Proben wurde mittels DSC (Differential Scanning Calorimetry) das Aufschmelzverhalten der einzelnen Lotlegierungen untersucht. Als Kalorimeter wurde ein Netsch DSC 404 Gerät verwendet.

Tabelle 2 zeigt die anhand der DSC-Analyse bestimmten Solidus- und Liquidus-Punkte der untersuchten Lotlegierungen A2, A3, A5 und A10.

Tabelle 2: Schmelzbereiche der Lotlegierungen

Lotlegierung	T solidus /°C	T liquidus /°C
A2	1059	1196
A3	1010	1254
A5	1039	1249
A10	1068	1244

Die in Tabelle 2 aufgeführten Solidus- und Liquidus-Punkte verdeutlichen den der Erfindung zugrunde liegenden Effekt der zusätzlich zum Element Bor eingesetzten, schmelzpunktniedrigenden Elemente Y und Pd.

Die Lotlegierung A10 weist neben Bor weder Y noch Pd auf, und besitzt dementsprechend die höchste Solidustemperatur 1068°C und eine Liquidustemperatur von 1244°C.

Lotlegierung A5 enthält 0,5 Gew-% Y aber kein Pd. A5 weist eine im Vergleich zu A10 deutlich abgesenkte Solidustemperatur von 1039°C auf, dessen Liquidustemperatur liegt aber mit 1249°C sogar etwas höher als A10.

Ein ähnlicher Effekt tritt bei A3 auf, welches 4 Gew.-% Pd enthält aber kein Y.

Werden Y und Pd gezielt kombiniert wie in Lotlegierung A2, werden sowohl Solidustemperatur (1059 °C) als auch Liquidustemperatur (1196 °C) gegenüber A10 erheblich abgesenkt. Diese Tatsache hat zur Folge, dass der Schmelzbereich als Differenz zwischen Liquiduspunkt und Soliduspunkt mit 137°C im Vergleich zu den anderen Lotlegierungen bei A2 am geringsten ausfällt. Dieser Umstand ist insofern vorteilhaft, als dass ein geringer Schmelzbereich ein schnelles und vollständiges Aufschmelzen der Lotlegierung beim Erhitzen ermöglicht. Dadurch wird eine Segregation der aufschmelzenden Lotlegierung verhindert und gleichzeitig ein optimales Benetzungs- und Rissfüllvermögen gewährleistet.

Daher ist die Kombination der beiden Legierungselemente Yttrium und Palladium und deren Verwendung neben Bor als Schmelzpunkterniedriger in der erfindungsgemäßen Lotlegierung besonders vorteilhaft.

Eine derart in ihrer Zusammensetzung optimierte Lotlegierung ist bislang aus dem Stand der Technik nicht bekannt.

Die Löttemperatur des hier beschriebenen Lotlegierung ist auf die verschiedenen Lösungsglühtemperaturen der polykristallinen oder gerichtet erstarrten oder einkristallinen Legierungen abgestimmt.

Weiterhin liegt es im Sinne der hier vorliegenden Erfindung, auf Basis der erfindungsgemäßen Lotlegierung ein neuartiges Mehrkomponenten-Lötsystem

bereitzustellen. Das neuartige Mehrkomponenten-Lötssystem besteht aus der erfindungsgemäßen Lotlegierung, wie sie oben beschrieben wurde, und zusätzlich aus mindestens einem Additivwerkstoff. Durch Vermengen der Lotlegierung und des Additivwerkstoffs erhält man das Mehrkomponenten-Lötssystem, wobei das Vermengen nicht auf die pulverförmigen Komponenten beschränkt sein muss.

Um die pulverförmigen Komponenten des Mehrkomponenten-Lötssystems auf die zu reparierenden Bereiche auftragen zu können, werden im Sinne der Erfindung diese Komponenten mit einem Binder vermengt. Die daraus entstehende Paste wird mit Hilfe einer Spritze oder mit Hilfe eines Spachtels auf die zu reparierenden Bereiche aufgetragen. Der Anteil des Binders im Mehrkomponenten-Lötssystem beträgt 1-15 Gew.-% der pulverförmigen Komponenten.

Bei den Additivwerkstoffen handelt es sich um Metallpulver einer Legierung, deren Schmelzbereich über dem Schmelzbereich der Lotlegierung liegt. Die Additivwerkstoffe können Nickelbasis- oder Kobaltbasislegierungen sein. Durch gezieltes Vermengen der erfindungsgemäßen Lotlegierung mit den Additivwerkstoffen wird ein Mehrkomponenten-Lötssystem bereitgestellt, das speziell an einen Werkstoff eines zu reparierenden Bauteils, insbesondere einer Leitschaufel einer Turbine, angepasst ist. Das Mehrkomponenten-Lötssystem besteht demnach aus einer variablen Pulvermenge der Lotlegierung mit mindestens einem Additivwerkstoff, wobei das Mischungsverhältnis aus Lotlegierung und Additivwerkstoff frei wählbar ist. Die Auswahl des geeigneten Mischungsverhältnisses obliegt daher dem hier angesprochenen Fachmann.

Bevorzugt sind Additivwerkstoffe, nämlich ein Metallpulver, welche neben Nickel (Ni) eine oder mehrere der folgenden Elemente enthalten:

- Chrom (Cr) in einem Anteil von bis zu 30 Gew.-%,
- Kobalt (Co) in einem Anteil von bis zu 20 Gew.-%,
- Wolfram (W) in einem Anteil von bis zu 15 Gew.-%,
- Molybdän (Mo) in einem Anteil von bis zu 10 Gew.-%,
- Aluminium (Al) in einem Anteil von bis zu 10 Gew.-%,
- Tantal (Ta) in einem Anteil von bis zu 10 Gew.-%,
- Titan (Ti) in einem Anteil von bis zu 10 Gew.-%,

Rhenium (Re) in einem Anteil von bis zu 10 Gew.-%,
Eisen (Fe) in einem Anteil von bis zu 5 Gew.-%,
Niob (Nb) in einem Anteil von bis zu 5 Gew.-%,
Yttrium (Y) in einem Anteil von bis zu 5 Gew.-%
Hafnium (Hf) in einem Anteil von bis zu 5 Gew.-%,
Palladium (Pd) in einem Anteil von bis zu 5 Gew.-%,
Kohlenstoff (C) in einem Anteil von bis zu 1 Gew.-%,
Zirkonium (Zr) in einem Anteil von bis zu 1 Gew.-%,
Bor (B) in einem Anteil von bis zu 1 Gew.-%,
Silizium (Si) in einem Anteil von bis zu 1 Gew.-%.

Bevorzugt verfügt der Additivstoff über folgende Zusammensetzung:

Chrom (Cr) in einem Anteil von 13,7 – 14,3 Gew.-%,
Kobalt (Co) in einem Anteil von 9 – 10 Gew.-%,
Wolfram (W) in einem Anteil von 3,7 – 4,3 Gew.-%,
Molybdän (Mo) in einem Anteil von 3,7 – 4,3 Gew.-%,
Aluminium (Al) in einem Anteil von 2,8 – 3,2 Gew.-%,
Titan (Ti) in einem Anteil von 4,8 – 5,2 Gew.-%,
Kohlenstoff (C) in einem Anteil 0,15 – 0,19 Gew.-%,
Zirkonium (Zr) in einem Anteil von 0,03 – 0,1 Gew.-%,
Bor (B) in einem Anteil von 0,01 – 0,02 Gew.-%,
Nickel (Ni) im Restanteil, sodass die Summe der Anteile 100 Gew.-% ergibt.

Die mechanischen Eigenschaften der Mehrkomponenten-Lötsysteme bestehend aus Lotlegierung und Additivwerkstoff wurden systematisch untersucht, um sicherzustellen, dass die Lotgefüge in den reparierten Bereichen aufgrund ihrer statischen und zyklischen Festigkeit über eine ausreichend hohe Widerstandskraft gegenüber den thermischen und mechanischen Belastungen in den Gasturbinen verfügen.

Zu diesem Zweck wurden nachfolgende Warmzugversuche und Ermüdungsversuche (LCF) durchgeführt.

Die hier beschriebenen Versuche wurden an einem ausgewählten Mehrkomponenten-Lötsystem durchgeführt, das sich durch gutes Aufschmelzverhalten und gutes Rissfüllvermögen auszeichnet. Dazu wurde die Lotlegierung A2 mit einem Additivwerkstoff M1 im Mischungsverhältnis 1:1 (Gewichtsprozent) vermengt, wobei M1 folgende Zusammensetzung aufweist:

Chrom (Cr) in einem Anteil von 13,7 – 14,3 Gew.-%,
Kobalt (Co) in einem Anteil von 9 – 10 Gew.-%,
Wolfram (W) in einem Anteil von 3,7 – 4,3 Gew.-%,
Molybdän (Mo) in einem Anteil von 3,7 – 4,3 Gew.-%,
Aluminium (Al) in einem Anteil von 2,8 – 3,2 Gew.-%,
Titan (Ti) in einem Anteil von 4,8 – 5,2 Gew.-%,
Kohlenstoff (C) in einem Anteil 0,15 – 0,19 Gew.-%,
Zirkonium (Zr) in einem Anteil von 0,03 – 0,1 Gew.-%,
Bor (B) in einem Anteil von 0,01 – 0,02 Gew.-%,
Nickel (Ni) im Restanteil, sodass die Summe der Anteile 100 Gew.-% ergibt.

Die Warmzugversuche wurden bei einer Temperatur von $871^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. Die Proben werden mittels eines StrahlungsOfens erhitzt, so dass über die gesamte Probe eine homogene Temperaturverteilung gewährleistet wurde. Die Versuche wurden an einer servohydraulischen Maschine durchgeführt. Die Abzugsgeschwindigkeit betrug 0,93 mm/min, so dass die Versuche als weggesteuert einzustufen sind.

Als Proben wurden Flachzugproben aus der DS Legierung René-142 mit einem Querschnitt von 6,35 x 1,5 mm und einer Mess-Strecke von 25,4 mm verwendet. Die Flachproben wurden den sonst verwendeten Rundproben vorgezogen, da sie von ihren Abmessungen her dem Anwendungsfall näher kommen; sie bilden dabei das dünnwandige Schaufelblatt einer Turbinenleitschaufel mit einer Wanddicke von 1,5 mm nach.

Getestet wurden jeweils drei Proben mit durchgängigen Lötspalten von 0,25 mm, 0,5 mm und 1,0 mm Breite, die mit dem beschriebenen Mehrkomponenten-Lötsystem A2/M1 gelötet bzw. verfüllt wurden.

Tabelle 3 zeigt die Mittelwerte der gemessenen Warmzugfestigkeiten (UTS), ebenfalls aufgeführt sind die UTS-Werte der Nickelbasislegierungen René-80 (polykristallin) und DS René-142 (gerichtet erstarrt) als Grundwerkstoffdaten.

Tabelle 3: Warmzugfestigkeiten (UTS) des Mehrkomponenten-Lötsystems A2/M1 für unterschiedliche Spaltweiten

Lötsystem	Spalt /mm	UTS/MPa
A2/M1	0,25	643
	0,50	519
	1,00	547
	René-80	648
	René-142 DS	858

Aus Tabelle 3 geht hervor, dass das Mehrkomponenten-Lötsystem A2/M1 über bemerkenswert gute Warmzugeigenschaften verfügt.

Für eine Spaltbreite von 0,25 mm entspricht die gemessene Warmzugfestigkeit (UTS) von A2/M1 dem Wert des Grundwerkstoffs René-80, was einem UTS-Wert von 75% von DSR142 entspricht. Auch bei einer Spaltbreite von 0,5 mm und 1,0 mm werden noch 80% (bezogen auf René-80) bzw. 60% (bezogen auf René-142) der Warmzugfestigkeit (UTS) erreicht.

Die Warmzugversuche geben Anhaltswerte für die Festigkeitseigenschaften der Lotgefüge. Die Ergebnisse der LCF-Versuche haben eine höhere Aussagekraft, da sie die thermomechanische Wechselbeanspruchung der Gasturbinen-Bauteile praxisnäher wiedergeben.

Die Testtemperatur der LCF-Versuche betrug $982^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, wobei die Flachproben aus der DS Legierung René-142 induktiv aufgeheizt wurden. Die Flachzugproben weisen einen Querschnitt von $9,53 \times 1,55 \text{ mm}$ und einer Mess-Strecke von 12,7 mm auf. Der Versuch wurde als axialer, kraft geregelter Zug-Schwellversuch mit sinusförmigen Lastverlauf

durchgeführt. Dabei wurden 20 Zyklen/min mit einem Verhältnis von Spannungsamplitude/Mittelspannung von 0,95 auf die Probe aufgebracht.

Bei unterschiedlichen Maximalspannungen wurden wie bei den Warmzugversuchen Flachproben des Mehrkomponenten-Lötsystem A2/M1 mit drei durchgängigen Lötspalten von 0,25 mm, 0,5 mm und 1,0 mm verwendet.

Die Ergebnisse der LCF-Versuche sind als Mittelwerte in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: LCF-Daten (Mittelwerte) des Mehrkomponenten- Lötsystems A2/M1 für verschiedene Spaltbreiten und Maximalspannungen.

Lötsystem	Spaltbreite /mm	Max. Spannung /MPa	Lastwechsel
A2/M1	0,25	152	50244
		173	6729
		207	4626
		241	702
A2/M1	0,5	152	9146
		173	11785
		241	949
A2/M1	1,0	152	9679
		173	4406
		207	842
		241	454
René-142 DS		311	13243
		345	7369
		380	2793
		414	1283
René-80		283	5000
		276	7000
		262	10000
		255	30000

Tabelle 4 zeigt, dass das Mehrkomponenten-Lötsystem A2/M1 über bemerkenswert gute Ermüdungseigenschaften verfügt.

Die LCF-Versuche zeigen wie die Warmzugversuche eine Abhängigkeit der Ermüdungs- bzw. Zugschwellfestigkeit von der Spaltbreite der Lotgefüge. Für eine Lastwechselzahl von 5000 Zyklen als einen typischen Wert für LCF-Versuche beträgt die Ermüdungsfestigkeit der A2/M1 Lotgefüge für Spaltbreiten von 0,25 mm und 0,5 mm 65-70% des Wertes vom René-80 Grundwerkstoff bzw. 50-55% des Wertes vom René-142 Grundwerkstoff. Für eine Spaltbreite von 1,0 mm ist nur ein geringer Abfall auf 60% (bezogen auf René-80) bzw. 48% der Ermüdungsfestigkeit des Grundwerkstoffs (bezogen auf René-142) festzustellen.

Die hier gemessenen Ermüdungs- bzw. Zugschwellfestigkeiten des Mehrkomponenten-Lötsystem A2/M1 sind deutlich höher als die nach dem Stand der Technik bekannten Mehrkomponenten-Lötsysteme.

Mithilfe der erfindungsgemäßen Lotlegierung bzw. des erfindungsgemäßen Mehrkomponenten-Lötsystem lässt sich ein neuartiges Verfahren zur Bearbeitung, vorzugsweise Reparatur, von Werkstücken, nämlich zur Bearbeitung von Leitschaukeln eines Flugzeugtriebwerks, bereitstellen. Die Werkstücke können aus einer polykristallinen oder gerichtet erstarrten oder einkristallinen Legierung hergestellt sein.

Das erfindungsgemäße Verfahren basiert auf einem Hochtemperatur-Diffusionslöten unter Verwendung der erfindungsgemäßen Lotlegierung bzw. unter Verwendung des erfindungsgemäßen Mehrkomponenten-Lötsystem. Es handelt sich hierbei um ein Reparaturverfahren. Das Hochtemperatur-Diffusionslöten erfolgt unter folgenden Bedingungen:

- Aufheizen unter Vakuum oder Schutzgas auf eine Temperatur von 1200 - 1260°C mit einer anschließenden Haltezeit von 15 - 60 min,
- Abkühlen unter Vakuum oder Schutzgas auf eine Temperatur von 1100 - 1140°C mit einer anschließenden Haltezeit von ca. 240 min,
- Abkühlen unter Vakuum oder Schutzgas auf eine Temperatur von 1080 - 1120°C mit einer anschließenden Haltezeit von ca. 60 min.

An das Hochtemperatur-Diffusionslöten kann sich folgende Wärmebehandlung anschließen: Aufheizen unter Vakuum oder Schutzgas auf eine Temperatur von 1065-1093°C mit einer anschließenden Haltezeit von ca. 240 min, wobei dies vorzugsweise im Rahmen eines Beschichtungsprozesses durchgeführt wird.

Weiterhin kann sich an das Hochtemperatur-Diffusionslöten folgende Wärmebehandlung anschließen: Aufheizen unter Vakuum oder Schutzgas oder Umgebungsatmosphäre auf eine Temperatur von 871-927°C mit einer anschließenden Haltezeit von 60 - 960 min, wobei dies vorzugsweise im Rahmen eines Auslagerungsprozesses durchgeführt wird.

Es ist selbstverständlich, dass die Verwendung der Lotlegierung und des Mehrkomponenten-Lötsystems nicht auf reine Reparaturverfahren beschränkt ist. Vielmehr ist die erfindungsgemäße Lotlegierung sowie das erfindungsgemäße Mehrkomponenten-Lötsystem allgemein auch für Fügeprozesse anwendbar. Bedingt durch das für Reparaturzwecke optimierte Mischungsverhältnis von Lotlegierung und ggf. Additivwerkstoffen, ist jedoch die Verwendung bei der Reparatur von Leitschaufeln eines Flugzeugtriebwerks besonders vorteilhaft.

Patentansprüche

1. Lotlegierung auf Nickelbasis, wobei die Lotlegierung mindestens folgende Elemente enthält:
Chrom (Cr), Kobalt (Co), Molybdän (Mo) und Nickel (Ni).
2. Lotlegierung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch:
Nickel (Ni) in einem Anteil von 63 – 86 Gew.-%,
Chrom (Cr) in einem Anteil von 5 – 17 Gew.-%,
Kobalt (Co) in einem Anteil von 8 – 15 Gew.-%,
Molybdän (Mo) in einem Anteil von 1 – 5 Gew.-%.
3. Lotlegierung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Lotlegierung zusätzlich Aluminium (Al) enthält.
4. Lotlegierung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Lotlegierung Aluminium (Al) in einem Anteil von 2 – 8 Gew.-% enthält.
5. Lotlegierung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Lotlegierung zusätzlich Tantal (Ta) in einem Anteil von 1 bis 8 Gew.-% und/oder Niob (Nb) in einem Anteil von 0,1 bis 2 Gew.-% enthält.
6. Lotlegierung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Lotlegierung zusätzlich Palladium (Pd) enthält, vorzugsweise in einem Anteil von 0,5 – 5 Gew.-%, und/oder Yttrium (Y) in einem Anteil von 0,1 – 1 Gew.-%.
7. Lotlegierung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Lotlegierung zusätzlich Hafnium (Hf) in einem Anteil von 1 bis 5 Gew.-% und/oder Silizium (Si) in einem Anteil von 0,1 bis 1 Gew.-% enthält.

8. Lotlegierung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Lotlegierung Bor (B) enthält, vorzugsweise in einem Anteil von 0,5 bis 2,5 Gew.-%.
9. Lotlegierung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 8, gekennzeichnet durch:
Chrom (Cr) in einem Anteil von 5 – 17 Gew.-%,
Kobalt (Co) in einem Anteil von 8 – 15 Gew.-%,
Molybdän (Mo) in einem Anteil von 1 – 5 Gew.-%,
Aluminium (Al) in einem Anteil von 2 – 8 Gew.-%,
Tantal (Ta) in einem Anteil von 1 – 8 Gew.-%,
Niob (Nb) in einem Anteil von 0,1 – 2 Gew.-%,
Yttrium (Y) in einem Anteil von 0,1 – 1 Gew.-%,
Hafnium (Hf) in einem Anteil von 1 – 5 Gew.-%,
Palladium (Pd) in einem Anteil von 0,5 – 5 Gew.-%,
Bor (B) in einem Anteil von 0,5 – 2,5 Gew.-%,
Silizium (Si) in einem Anteil von 0,1 – 1 Gew.-%,
Nickel (Ni) im Restanteil, sodass die Summe der Anteile 100 Gew.-% ergibt.
10. Lotlegierung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 8, gekennzeichnet durch:
Chrom (Cr) in einem Anteil von 9 – 11 Gew.-%,
Kobalt (Co) in einem Anteil von 9 – 11 Gew.-%,
Molybdän (Mo) in einem Anteil von 3,5 – 4,5 Gew.-%,
Aluminium (Al) in einem Anteil von 3,5 – 4,5 Gew.-%,
Tantal (Ta) in einem Anteil von 1,5 – 2,5 Gew.-%,
Niob (Nb) in einem Anteil von 0,5 – 1,5 Gew.-%,
Yttrium (Y) in einem Anteil von 0,1 – 0,5 Gew.-%,
Hafnium (Hf) in einem Anteil von 3,5 – 4,5 Gew.-%,
Palladium (Pd) in einem Anteil von 3,5 – 4,5 Gew.-%,
Bor (B) in einem Anteil von 1,5 – 2,0 Gew.-%,
Nickel (Ni) im Restanteil, sodass die Summe der Anteile 100 Gew.-% ergibt.

11. Verwendung einer Lotlegierung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 10 zur Reparatur von Bauteilen einer Gasturbine, insbesondere zur Reparatur der Leitschaufeln einer Gasturbine, wobei die Gasturbine als Flugzeugtriebwerk oder stationäre Gasturbine ausgebildet ist.
12. Mehrkomponenten-Lötsystem, bestehend aus einer Lotlegierung und einem Additivwerkstoff als Komponenten des Mehrkomponenten-Lötsystems, gekennzeichnet durch eine Lotlegierung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 10 und durch mindestens einen Additivwerkstoff, dessen Schmelzbereich über dem Schmelzpunkt der Lotlegierung liegt.
13. Mehrkomponenten-Lötsystem nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Additivwerkstoff einer Nickelbasislegierung oder Kobaltbasislegierung entsprechen.
14. Mehrkomponenten-Lötsystem nach Anspruch 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Additivwerkstoff auf Nickelbasis ausgebildet ist und neben Nickel (Ni) ein oder mehrere der folgenden Elemente enthält:
Chrom (Cr) in einem Anteil von bis zu 30 Gew.-%,
Kobalt (Co) in einem Anteil von bis zu 20 Gew.-%,
Wolfram (W) in einem Anteil von bis zu 15 Gew.-%,
Molybdän (Mo) in einem Anteil von bis zu 10 Gew.-%,
Aluminium (Al) in einem Anteil von bis zu 10 Gew.-%,
Tantal (Ta) in einem Anteil von bis zu 10 Gew.-%,
Titan (Ti) in einem Anteil von bis zu 10 Gew.-%,
Rhenium (Re) in einem Anteil von bis zu 10 Gew.-%,
Eisen (Fe) in einem Anteil von bis zu 5 Gew.-%,
Niob (Nb) in einem Anteil von bis zu 5 Gew.-%,
Yttrium (Y) in einem Anteil von bis zu 5 Gew.-%,
Hafnium (Hf) in einem Anteil von bis zu 5 Gew.-%,
Palladium (Pd) in einem Anteil von bis zu 5 Gew.-%,
Kohlenstoff (C) in einem Anteil von bis zu 1 Gew.-%,
Zirkonium (Zr) in einem Anteil von bis zu 1 Gew.-%,

Bor (B) in einem Anteil von bis zu 1 Gew.-%,
Silizium (Si) in einem Anteil von bis zu 1 Gew.-%.
Nickel (Ni) im Restanteil, sodass die Summe der Anteile 100 Gew.-% ergibt.

15. Mehrkomponenten-Lötsystem nach einem oder mehreren der Ansprüche 12 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass der Additivwerkstoff auf Nickelbasis ausgebildet ist und neben Nickel (Ni) ein oder mehrere der folgenden Elemente enthält:

Chrom (Cr) in einem Anteil von 13,7 – 14,3 Gew.-%,
Kobalt (Co) in einem Anteil von 9 – 10 Gew.-%,
Wolfram (W) in einem Anteil von 3,7 – 4,3 Gew.-%,
Molybdän (Mo) in einem Anteil von 3,7 – 4,3 Gew.-%,
Aluminium (Al) in einem Anteil von 2,8 – 3,2 Gew.-%,
Titan (Ti) in einem Anteil von 4,8 – 5,2 Gew.-%,
Kohlenstoff (C) in einem Anteil 0,15 – 0,19 Gew.-%,
Zirkonium (Zr) in einem Anteil von 0,03 – 0,1 Gew.-%,
Bor (B) in einem Anteil von 0,01 – 0,02 Gew.-%,
Nickel (Ni) im Restanteil, sodass die Summe der Anteile 100 Gew.-% ergibt.

16. Verwendung eines Mehrkomponenten-Lötsystems nach einem oder mehreren der Ansprüche 12 bis 15 zur Reparatur von Bauteilen einer Gasturbine, insbesondere zur Reparatur der Leitschaufeln einer Gasturbine, wobei die Gasturbine als Flugzeugtriebwerk oder stationäre Gasturbine ausgebildet ist.

17. Verfahren zur Bearbeitung, insbesondere zur Reparatur oder Fertigung, von Werkstücken, insbesondere von Leitschaufeln einer Gasturbine, wobei die Bearbeitung des Werkstücks durch Löten mit einer Lotlegierung oder mit einem Mehrkomponenten-Lötsystem erfolgt, dadurch gekennzeichnet, dass die Lotlegierung auf Nickelbasis besteht und mindestens folgende Elemente enthält: Chrom (Cr), Kobalt (Co), Molybdän (Mo) und Nickel (Ni).

18. Verfahren nach Anspruch 17, gekennzeichnet durch eine Lotlegierung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 10.

19. Verfahren nach Anspruch 17 oder 18, gekennzeichnet durch ein Mehrkomponenten-Lötsystem nach einem oder mehreren der Ansprüche 12 bis 15.
20. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 17 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass Hochtemperatur-Diffusionslöten als Lötverfahren eingesetzt wird.
21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass das Hochtemperatur-Diffusionslöten als Lötverfahren unter folgenden Bedingungen erfolgt:
Aufheizen unter Vakuum oder Schutzgas auf eine Temperatur von 1200 - 1260°C mit einer anschließenden Haltezeit von 15 - 60 min,
Abkühlen unter Vakuum oder Schutzgas auf eine Temperatur von 1100 - 1140°C mit einer anschließenden Haltezeit von ca. 240 min,
Abkühlen unter Vakuum oder Schutzgas auf eine Temperatur von 1080 - 1120°C mit einer anschließenden Haltezeit von ca. 60 min.
22. Verfahren nach Anspruch 20 oder 21, dadurch gekennzeichnet, dass sich an das Hochtemperatur-Diffusionslöten folgende Wärmebehandlung anschließt:
Aufheizen unter Vakuum oder Schutzgas auf eine Temperatur von 1065-1093°C mit einer anschließenden Haltezeit von ca. 240 min, wobei dies vorzugsweise im Rahmen eines Beschichtungsprozesses durchgeführt wird.
23. Verfahren nach Anspruch 20 oder 21, dadurch gekennzeichnet, dass sich an das Hochtemperatur-Diffusionslöten folgende Wärmebehandlung anschließt:
Aufheizen unter Vakuum oder Schutzgas oder Umgebungsatmosphäre auf eine Temperatur von 871-927°C mit einer anschließenden Haltezeit von 60 - 960 min, wobei dies vorzugsweise im Rahmen eines Auslagerungsprozesses durchgeführt wird.

Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft eine Lotlegierung und ein Mehrkomponenten-Lötsystem, die Verwendung derselben, sowie ein Reparaturverfahren von Gasturbinenbauteilen.

Die Lotlegierung auf Nickelbasis enthält folgende Elemente: Nickel (Ni), Chrom (Cr), Kobalt (Co), Molybdän (Mo), Aluminium (Al), Tantal (Ta), Niob (Nb), Yttrium (Y), Hafnium (Hf), Palladium (Pd), Bor (B) und Silizium (Si).

Das Mehrkomponenten-Lötsystem besteht aus der erfindungsgemäßen Lotlegierung und aus zusätzlich mindestens einem Additivwerkstoff. Die Additivwerkstoffe bestehen aus folgenden Elementen: Nickel (Ni), Chrom (Cr), Kobalt (Co), Molybdän (Mo), Aluminium (Al), Tantal (Ta), Titan (Ti), Rhenium (Re), Eisen (Fe), Niob (Nb), Yttrium (Y), Hafnium (Hf), Palladium (Pd), Kohlenstoff (C), Zirkonium (Zr), Bor (B) und Silizium (Si).

Durch gezieltes Vermengen von Lotlegierung und Additivwerkstoffen entsteht ein Mehrkomponenten-Lötsystem, das speziell an den Werkstoff des zu reparierenden Bauteils angepasst ist, wobei das Mischungsverhältnis aus Lotlegierung und Additivwerkstoffen frei wählbar ist.

Das erfindungsgemäße Reparaturverfahren basiert auf dem Hochtemperatur-Diffusionslöten unter Verwendung der erfindungsgemäßen Lotlegierung bzw. des erfindungsgemäßen Mehrkomponenten-Lötsystems.